

С. А. Новокрещенов,  
А. С. Чуркин,  
Н. И. Ульяшин,  
Е. В. Сучков

## УПРАВЛЕНИЕ ИНЕРЦИОННЫМИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ К вопросу об устойчивости САР тепловых процессов

Процессы и агрегаты металлургического производства как объекты автоматизации и управления изучены слабо, что весьма затрудняет проектные и наладочные работы по их автоматизации. В частности, для большинства тепловых процессов лишь частично определены статические и динамические характеристики по различным каналам регулирования, что лишает возможности обоснованно выбирать регуляторы и рассчитывать их настройки.

Многие реальные металлургические объекты регулирования в той или иной степени обладают самовыравниванием, и поэтому их можно отнести к так называемым устойчивым, или статическим, объектам. Например, большинство печей обладает самовыравниванием температуры при изменении прихода или расхода энергии (тепла). Количественно явление самовыравнивания характеризуется степенью самовыравнивания — величиной, обратной коэффициенту передачи объекта  $K_{ос}$ .

При моделировании динамики тепловых процессов многие исследователи аппроксимируют их совокупностью (последовательным соединением) нескольких типовых элементарных звеньев: инерционных, безынерционных и транспортного запаздывания. В литературе, как правило, они представлены последовательным соединением звена чистого запаздывания и апериодического звена первого порядка с динамическими характеристиками: постоянной запаздывания объекта  $T_{ос}$  и постоянной времени объекта  $T_{ос}$ . А реакция объекта на единичное скачкообразное возмущение в переходном процессе описывается линейным дифференциальным уравнением первого (реже второго) порядка.

Применяемые в настоящее время в металлургической промышленности автоматические регуляторы реализуют четыре основных закона регулирования: пропорциональный (П-), интегральный (И-), пропорционально-интегральный (ПИ-) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-).

Оценка устойчивости замкнутых САР с тем или иным типом регулятора производится на основе совместного решения дифференциального уравнения объекта и регулятора. Однако для анализа устойчивости линейных систем используют алгебраические и частотные критерии. Например, по диаграмме И. А. Вышнеградского - М. А. Айзermana можно определить форму протекания процесса регулирования (устойчивости САР), зная лишь числовые значения коэффициентов уравнения САР, и степень затухания для систем третьего порядка. Для более высокого порядка САР используют критерий Найквиста. С его помощью можно определить частоту, при которой система находится на границе устойчивости.

Проведенные нами исследования, а также анализ данных, представленных в литературе, показали, что регулирование по отклонению в системах, аппроксимированных линейными моделями с использованием традиционных законов регулирования в контуре обратной связи, возможно при выполнении следующих неравенств:

$$\frac{\tau_p}{\tau_{ог}} \geq 2; \quad \omega_{кр} \leq \frac{\pi}{2 \cdot \tau_{ог}},$$

где  $\tau_p$  - допустимая длительность переходного процесса (время регулирования);

$\omega_{кр}$  - критическая частота входных колебаний (возмущающих воздействий).

В ходе экспериментальных исследований на ряде доменных печей Новолипецкого (НЛМК) и Череповецкого металлургических комбинатов была выявлена ярко выраженная нелинейность тепловых процессов по целому ряду каналов передачи воздействия. Обработка экспериментальных данных более 250 выпусков чугуна показала, что в зависимости от уровня базового (квазиустановившегося) состояния процесса изменяется в достаточно широких пределах: например, по каналу передачи воздействия "расход кокса" - "содержание кремния в чугуне" изменяется до 20-25% (отн.), а по каналу "расход природного газа" - "содержание кремния в чугуне" - до 30-40% (отн.). Ряд исследователей также приводят данные по статическим и динамическим характеристикам других металлургических агрегатов. Так, анализ приведенных в литературе данных по печам кипящего слоя показал, что нелинейность по некоторым каналам передачи воздействия достигает 80% (отн.).

Как показали исследования, наиболее нестабильными являются динамические характеристики процессов. Сюда следует отнести и погрешности оценки динамических параметров. Опубликованные ранее исследования показывают, что погрешность оценки  $T_{06}$  и  $\tau_{06}$  зависит от величины возмущения и, например, для тепловых процессов доменной печи достигает 40-60 и 100-150% (отн.) соответственно. Увеличение тестового контролируемого воздействия снижает погрешность оценки динамических характеристик, но и в этом случае она составляет не менее 25-30% (отн.).

На повышение нестабильности динамических параметров тепловых процессов оказывают влияние неконтролируемые возмущающие воздействия, природа и динамические свойства которых к настоящему времени изучены весьма слабо. Наши исследования на доменной печи N 6 НЛМК показали, что эффект действующих неконтролируемых возмущений, приведенных к выходу процесса, составляет 0,5% (абс.) содержания кремния в чугуне на выпуске. А на интервале времени между выпусками (при 18-21 выпуске в сутки) эта величина достигает 0,4 % (абс.).

Следует отметить, что тепловые процессы в доменных печах по целому ряду каналов передачи воздействия достаточно инерционны:  $\tau_{06}$  составляет 4-5 часов, а  $T_{06} = 1-2$  часа. Следовательно, общая продолжительность переходного процесса достигает 12 часов.

Как было отмечено выше, на устойчивость САР оказывает влияние частота возмущающих воздействий. Анализ результатов исследований показал, что для доменного процесса характерны не единичные возмущающие воздействия, а периодически изменяющиеся как по амплитуде, так и по частоте. Например, по каналу "рудная нагрузка - содержание кремния в чугуне" частота изменений входного воздействия достигает  $4,3 \times 10^{-5}$  с<sup>-1</sup>, а изменение действия неконтролируемых возмущений происходит с частотой  $1,5 \times 10^{-5}$  с<sup>-1</sup>. Критическая же частота должна быть не выше  $3,9 \times 10^{-5}$  с<sup>-1</sup>. Время регулирования таких инерционных процессов при использовании любого типа регулятора (даже при единичном ступенчатом возмущающем воздействии) составляет более 10 часов, что лежит за границей применимости регуляторов с точки зрения быстрого действия.

Подводя итог, можно отметить следующее.

Инерционные тепловые процессы ряда металлургических агрегатов

как объекты регулирования проявляют нелинейные статические и динамические свойства, поэтому применять линейный математический аппарат для их моделирования не всегда корректно. Автоматическое регулирование таких процессов с использованием традиционных законов регулирования по отклонению невозможно, так как система находится за границей устойчивости по частоте возмущающих воздействий и быстродействия. Эффект действующих неконтролируемых возмущений соизмерим по абсолютной величине с управляющими (контролируемыми) воздействиями, а по частоте превышает на порядок, следовательно, оказывает большое влияние на устойчивость САР. Проведенные и опубликованные ранее исследования показывают, что динамика неконтролируемых возмущений для условий работы доменной печи может быть описана моделью звена чистого запаздывания и апериодического звена первого порядка (или безынерционного звена). Оценка динамических характеристик требует уточнения и проведения дополнительных исследований.

Таким образом, задача управления инерционными металлургическими процессами, а, следовательно, и обеспечения устойчивости замкнутой САР включает в себя прогноз влияния контролируемых возмущений, оперативное выявление эффекта действующих возмущений и с учетом динамики процесса выбор управляющих воздействий регулированием по возмущению. Этим требованиям отвечает метод натурно-математического моделирования с использованием ЭВМ, работающей в темпе с процессом.

А. Б. Чуркин,  
Б. С. Чуркин

#### СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК

Математическую модель затвердевания отливок можно неявно записать в виде краевой задачи теплообмена в системе "отливка-форма-окружающая среда". Для тел классических конфигураций данная краевая задача сводится к следующей системе уравнений:

$$\frac{dH_1}{dn} = \frac{d^2U_1}{d\Psi^2} + \frac{K}{\Psi} \cdot \frac{dU_1}{d\Psi}, \quad 0 < \Psi < \frac{1}{2}; \quad (1)$$